

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ

*Царьков А.А.*

*Руководитель – доц., к.т.н. Чурюмов А.Ю.*

ФГОУ ВПО НИТУ «МИСиС», г. Москва churyumov@mail.ru

Создание моделей эволюции структуры и свойств алюминиевых сплавов, в том числе двухфазных, в процессе горячей пластической деформации позволит существенно понизить затраты на разработку технологии и выбор составов сплавов, для достижения заданного уровня свойств.

Объектами исследования выбраны сплавы двух систем: квазибинарного разреза системы эвтектического типа Al-Mg-Si и Al-Ni, в структуре которых содержались частицы  $Mg_2Si$  и  $Al_3Ni$  соответственно. В сплавах этих систем можно варьировать объемную долю частиц интерметаллидных фаз эвтектического происхождения, изменяя процентное содержание легирующих элементов. Составы исследуемых модельных сплавов и полученная, объемная доля частиц  $f$ , приведены для разных систем в таблице 1. Значение объемной доли рассчитывали исходя из равновесной диаграммы состояния с использованием пакета программ ThermoCalc.

Таблица 1 – Составы исследуемых сплавов и объемная доля содержащихся в них интерметаллидов

Сплав №	Массовая доля компонента, %		Объемная доля интерметаллидов в сплаве, %	Измеренная объемная доля интерметаллидов в сплаве, %
Система Al-Ni	Ni		$f(Al_3Ni)$	$f(Al_3Ni)$
1	6		10	$10 \pm 1$
2	2		3	$3 \pm 1$
Система Al-Mg-Si	Mg	Si	$f(Mg_2Si)$	$f(Mg_2Si)$
3	8,2	4,75	18	$15 \pm 2$
4	3,8	2,2	8	$7 \pm 2$

Экспериментальные зависимости напряжения течения от скорости, температуры и степени деформации получали испытаниями на сжатие при разных температурах и скоростях деформации на величину истинной деформации равную 0,7. Испытания проводили на комплексе для физического моделирования термомеханических процессов Gleeble 3800. Исходная структура представляла собой матрицу обедненного

твердого раствора на основе алюминия с равномерно распределенными частицами второй фазы. Образцы, отожженные по разным режимам, подвергали деформации сжатием при разных скоростях и температурах деформации. Структура сплавов после деформации по всем исследованным схемам представляла собой зерна, вытянутые в виде волокон перпендикулярно оси деформации.

Анализ микроструктур и диаграмм деформации показал отсутствие следов рекристаллизации что связано с тем что частицы являются эффективным препятствием для процесса динамической рекристаллизации. Зависимость свойств от технологических параметров имеет классический вид. С повышением температуры и понижением скорости испытания напряжение течения возрастает (рисунок 3).

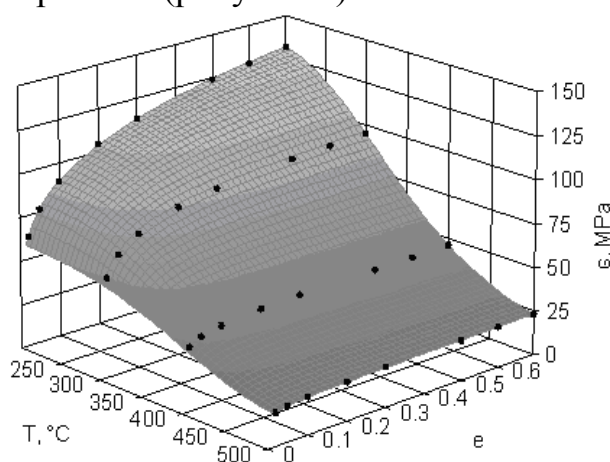


Рисунок 3 - Зависимости напряжения течения от температуры испытания (сплав Al-6Ni 36ч отжига при 630 °C)

Для моделирования зависимости напряжения течения от скорости и температуры деформации для каждого сплава находились конкретные математические зависимости, из уравнения (1).

$$\dot{\varepsilon} = A \sinh(\alpha \sigma)^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right), \quad (3)$$

где  $\sigma$  – напряжение течения, МПа;

$\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;

$Q$  – энергия активации пластической деформации, Дж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

$T$  – температура деформации, К;

$A, \alpha, n$  – коэффициенты.

Линейная зависимость между логарифмом гиперболического синуса напряжения течения, логарифмом скорости деформации и обратной температурой может быть получена логарифмированием уравнения (1).

$$n \cdot \ln[\sinh(\alpha \sigma)] = \ln \dot{\varepsilon} - \ln A + \frac{Q}{RT}, \quad (4)$$

В координатах  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\epsilon} - 1/RT$  данная зависимость будет иметь вид плоскости. При этом коэффициент  $\alpha$  подбирался таким образом, чтобы экспериментальные данные соответствовали линейной зависимости (2). Оптимальное значение данного коэффициента оказалось равным 0,08. При этом коэффициент линейной регрессии был больше 0,96.

Методом минимизации ошибки между расчетными и экспериментальными значениями были получены численные значения неизвестных констант. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений представлено на рисунке 4. Средняя ошибка модели составила 6,6%.

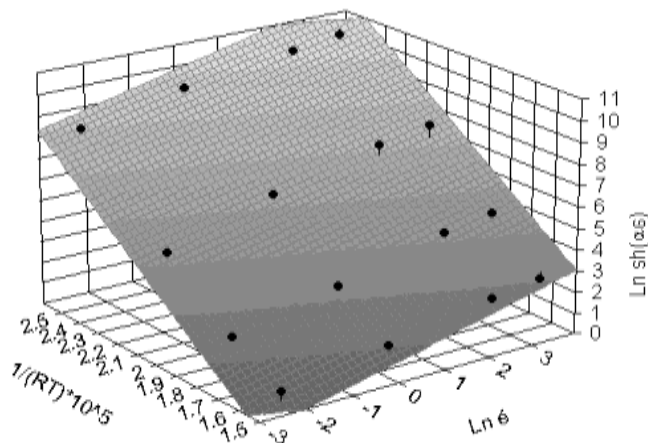


Рисунок 4 - Сопоставление экспериментальных и расчетных данных (сплав Al-6Ni 3ч отжига при 450 °C)

## Выводы

Получена математическая модель зависимости напряжения течения от технологических параметров горячей деформации сплавов систем

Al-Mg-Si и Al-Ni с разной объемной долей и размером частиц вторых фаз. Среднеквадратичная ошибка модели составила 6,6 %.